

*Литвинов Д.Н., Костарев В.С., Таишыков О.Л.,  
Климова В.А., Аристов Н.М., Злоказов С.Б.*

## **ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА С МИШЕНЯМИ ДЛЯ НАРАБОТКИ ИЗОТОПА СЕЛЕН-75**

*Аннотация.* Подчеркнута важность использования радиоизотопной продукции в промышленности, науке и медицине. Приведена информация о наработке изотопной продукции в исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М АИЦ «Институт реакторных материалов» и планы расширения номенклатуры производимых радиоизотопов. Описаны особенности наработки изотопа селен-75. Обоснована необходимость проведения теплогидравлического моделирования мишени для наработки селена-75 в условиях реактора ИВВ-2М. Описан процесс построения твердотельной модели мишени и моделирования тепловых условий наработки изотопов. Анализ теплогидравлических процессов проводился в данной работе при помощи программного комплекса Solidworks Flow Simulation.

*Ключевые слова:* радиоактивный изотоп, исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М, облучательное устройство, селен-75, теплогидравлическое моделирование, Solidworks, Flow Simulation.

*Abstract.* It is emphasized the importance of using radioisotope products in industry, science and medicine. Information is given on the generation of isotope products in the IVV-2M research reactor of Research Institute of Nuclear Materials, and the plans for expanding the range of radioisotopes produced. The features of the selenium-75 isotope production are described. The necessity of thermohydraulic simulation of the target for producing selenium-75 in the conditions of the IVV-2M reactor is substantiated. The process of constructing a solid-state model of the target and simulating the thermal conditions to produce isotopes is described. In this work, the analysis of thermohydraulic processes was performed with Solidworks Flow Simulation software.

*Keywords:* radioactive isotope, IVV-2M research reactor, irradiation device, selenium-75, thermal and hydraulic simulation, Solidworks, Flow Simulation

### **Введение**

Со времени открытия радиоактивности ученые научились получать радиоизотопы с заранее определенными свойствами, которые используются в различных областях науки и техники (в медицине, биологии, дефектоскопии и т.д.) [1]. Роль радиоизотопов с развитием технического прогресса постоянно возрастает. Их получают в ядерных реакторах и на ускорителях элементарных частиц. При реакторном способе получения капсулу с изотопом-мишенью помещают в активную зону реактора, где под действием нейтронного излучения образуются необходимые изотопы [2, 3]. Транспортировка радиоактивных изотопов к потребителю осуществляется в специальных контейнерах, радиационная защита которых зависит от вида излучения и его энергии [4-6].

Среднепоточный исследовательский реактор на тепловых нейтронах ИВВ-2М Института реакторных материалов (г. Заречный) в 1960-1980-е гг. использовался для исследований по радиационному материаловедению, испытания топливных композиций, элементов активных зон ядерных реакторов и других задач. В 1990-е годы АО «ИРМ» приступил к производству радиоизотопной продукции и в настоящее время успешно совмещает научные исследования и производство радиоизотопной продукции. В настоящее время наработка радиоактивных изотопов использует более 2/3 ресурсов ИВВ-2М.

В результате проработки альтернативных путей использования реактора ИВВ-2М сформировалось новое направление деятельности, связанное с разработкой технологий производства радиоизотопной продукции для прикладных задач и научных исследований, а также производство и коммерческие поставки радиоизотопной продукции для дефектоскопии, ядерной медицины и фармацевтических исследований. В настоящее время АО «ИРМ» поставляет на мировой рынок  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{131}\text{Cs}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  и продолжает совершенствование действующих и разработку новых программ [7].

В кратко- и среднесрочной перспективе на ИВВ-2М планируется организовать новые производства по наработке изотопной продукции  $^{125}\text{I}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Y}$  и др. [8].

Селен-75, один из наиболее востребованных радиоизотопов, используется в качестве источника гамма-излучения для дефектоскопии и в медицине. Данный радиоизотоп получается облучением нейтронами природного изотопа селен-74. Селен-75 является альтернативой иридию-192, обеспечивает более мягкий спектр гамма-излучения, благодаря чему повышается чувствительность радиографического контроля, и имеет больший период полураспада. Селен-75 распадается в результате захвата электрона с периодом полураспада 120 суток. Энергия основных испускаемых линий 121, 136, 265, 280 и 400 кэВ со средней энергией в районе 215 кэВ [9].

Облучательные устройства для наработки изотопов являются специальным элементом ядерного реактора. Они размещаются в полости топливной сборки и включают в себя ячейки с первичным сырьем, в которых под воздействием нейтронного облучения образуется целевой изотоп.

Селен-75 плавится при температуре  $217^{\circ}\text{C}$  и имеет температуру кипения  $680^{\circ}\text{C}$ . Селен реагирует со многими металлами – это усложняет методы его получения. Так, например, если ампула для селена изготовлена из титана, то при температуре  $400^{\circ}\text{C}$  селен взаимодействует с металлом ампулы с образованием сквозных свищей [10].

В связи с особенностями конструкции реактора и происходящими в нем ядерно-физическими процессами, исследование экспериментальными методами теплообмена и гидродинамики в устройстве, где происходит наработка радиоизотопа, затруднено. В связи с этим для оценки условий наработки изотопа селен-75 было применено компьютерное моделирование теплогидравлических параметров. Современные пакеты анализа гидродинамики и теплообмена способны решать широкий круг задач, в числе которых анализ теплообмена в устройствах сложной геометрии. Одним из таких пакетов является Solidworks с прикладным модулем Flow Simulation, возможности которого были верифицированы на примере нескольких элементарных задач из разных областей теплообмена и гидродинамики, причем результаты моделирования сравнивались с экспериментом и результатами узкоспециализированных расчетных кодов. На кафедре Атомные станции и возобновляемые источники энергии УрФУ компьютерное моделирование уже несколько лет применяется для понимания процессов, происходящих в оборудовании ядерных энергетических установок [11-14].

### **Методы и технологии**

В данной работе рассматривается моделирование теплогидравлических условий процесса наработки изотопа селен-75 в реакторе ИВВ-2М Института реакторных материалов, расположенного в городе Заречный.

Для анализа был выбран участок активной зоны, состоящий из 6 ТВС, стойки с семью облучательными устройствами, семью хвостовиками и опорной плитой. Каждое устройство содержит десять алюминиевых трубок, в которых находятся ванадиевые капсулы с сырьём для наработки изотопа. Была построена модель облучательного устройства (рисунок 1), проведено моделирование течения теплоносителя сквозь облучательное устройство в изотермических условиях [15, 16]. Полученные результаты с достаточной степенью точности согласуются с теоретическим прогнозом течения сквозь модель. Компоновка исследуемого участка приведена на рисунке 2.

Основной используемый в модели конструкционный материал – алюминий. Он является коррозионно-устойчивым по отношению к воде, продукты распада, образующиеся под воздействием облучения, короткоживущие, а также он обладает низким сечением захвата тепловых нейтронов. Сплав алюминий также является основным конструкционным мате-



Рисунок 1 – Облучательное устройство с установленными мишенями для наработки изотопа селен-75

риалом активной зоны ИВВ-2М. Капсулы выполнены из ванадия, так как он меньше подвержен активации под действием нейтронного облучения.

Для расчёта теплогидравлических процессов был выбран SolidWorks Flow Simulation. Многократные исследования показывают, что параметры, наиболее близкие к расчетным значениям температур, были получены в программе SolidWorks Flow Simulation, результаты других программ отличаются от инженерного расчета в большей степени, что приводит к необходимости введения дополнительных поправок, но не делает их менее востребованными при инженерном анализе теплофизических процессов [17].

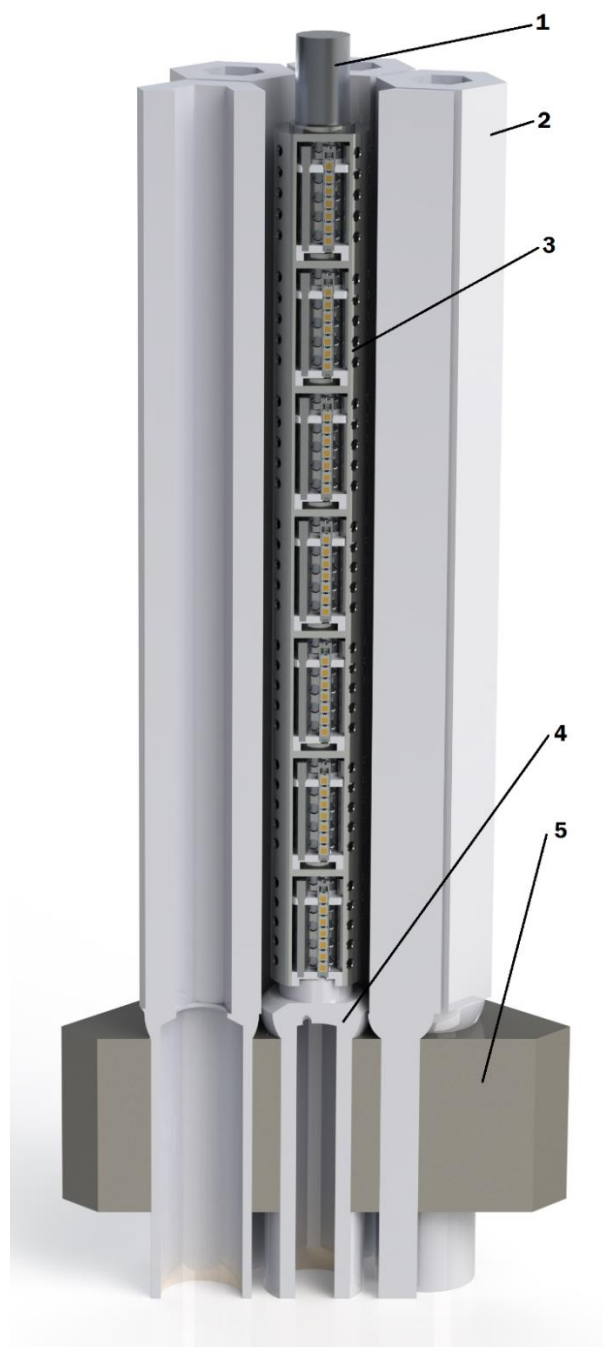


Рисунок 2 – Модель стойки с мишенями для наработки селена: 1 – стойка; 2 – ТВС; 3 – мишень; 4 – хвостовик; 5 – опорная плита реактора ИВВ-2М

Анализ теплогидравлических процессов производится на основании системы уравнений Навье-Стокса для ламинарного и турбулентного течения, которые являются формулировками законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости или газа [18]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (p u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность,  $u$  – скорость,  $p$  – давление текущей среды,  $t$  – время,  $S$  – внешние массовые силы, действующие на единицу массы текущей среды (например, сопротивление пористого тела, гравитация, вращение),  $E$  – полная энергия единицы массы текущей среды,  $Q_H$  – тепловыделение (или поглощение) на единицу объема,  $q$  – распределенный тепловой поток,  $\tau$  – тензор вязких сдвиговых напряжений; нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Система уравнений замыкается уравнениями состояния текущей среды и эмпирическими зависимостями вязкости и теплопроводности от температуры. Для расчета турбулентных течений используется метод RANS (усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). При этом в системе уравнений появляются добавочные члены (напряжения Рейнольдса):

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4)$$

где  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ ,  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$  – дельта-функция Кронекера,  $\mu_t$  – коэффициент вязкости турбулентных вихрей,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности. Для расчета ламинарных и турбулентных течений используется одна и та же система уравнений, но при ламинарном течении  $k$  и  $\mu_t = 0$ . В рамках  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, где  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности,

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

$f_\mu$  – комплекс, учитывающий турбулентную вязкость.

Для расчёта были заданы условия течения на входе и на выходе из расчетного участка. На входе создано граничное условие в виде объёмного расхода в размере 12 м³/ч, что соответствует действительному расходу через участок активной зоны реактора. На выходе из участка задано статическое давление жидкости. При помощи высокопрецизионного расчетного кода, использующего метод Монте-Карло, были определены удельные тепловыделения в ячейках селена и ванадиевых капсулах, вызванные гамма-излучением и тепловыми нейтронами, которые равны 4,5 Вт/г и 5,25 Вт/г, соответственно. Для тепловыделяющих сборок было задано значение объёмного тепловыделения 400 кВт, соответствующее энерговыделению в

реакторе. Так как модель ограничена участком активной зоны, на боковых границах расчетной области задано условие симметрии.

В модель добавлены характеристики материалов в виде зависимости теплоемкости, теплопроводности и плотности от температуры.

В ходе исследования особое внимание обращалось на то, чтобы температура ячеек для наработки селена не превышала температуру плавления селена, которая равна  $217^{\circ}\text{C}$ . Перепад температуры теплоносителя по длине канала должен составлять  $25\text{--}35^{\circ}\text{C}$ .

### Результаты и обсуждение

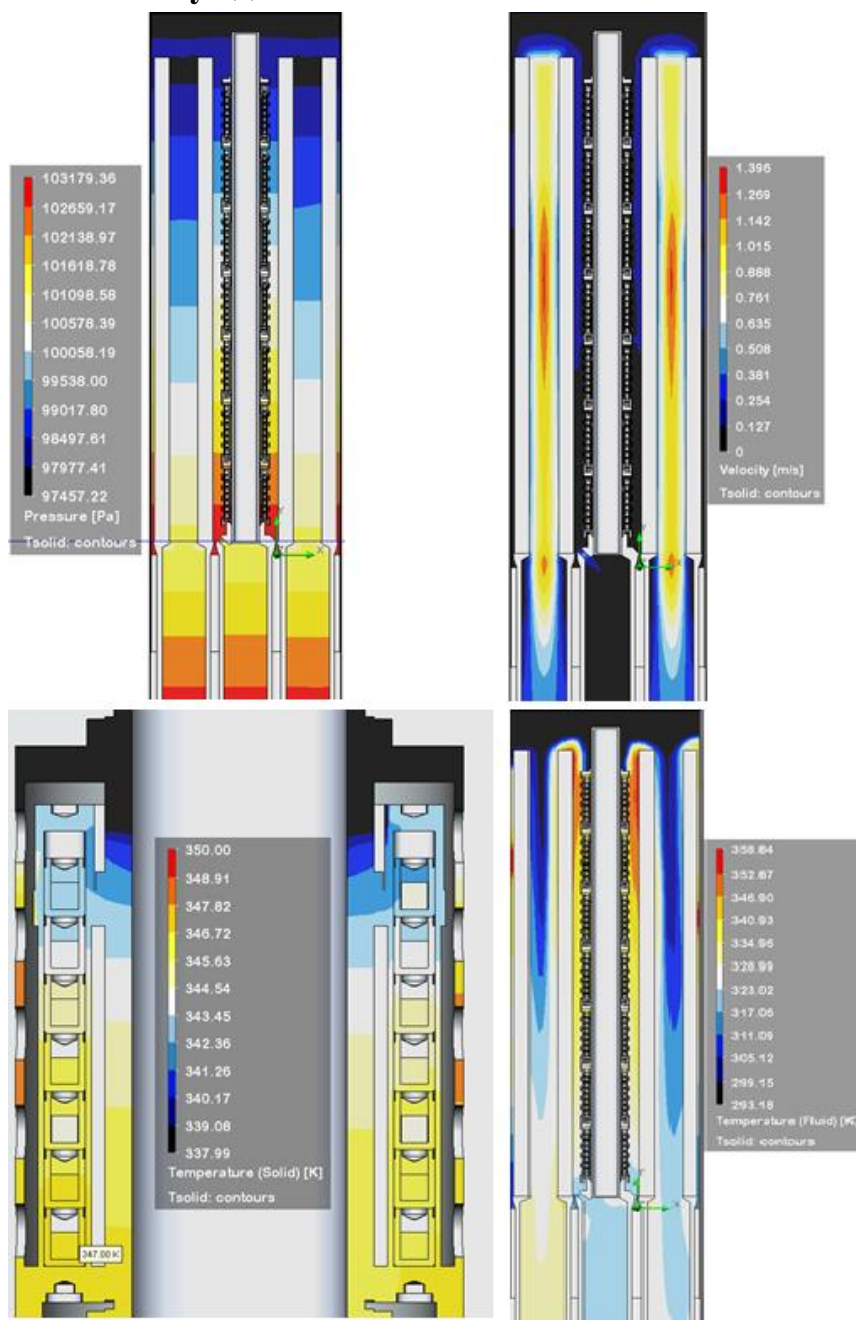


Рисунок 3 – Результаты моделирования

По результатам расчётов в Solidworks Flow Simulation была построена модель участка реактора ИВВ-2М с реальными геометрическими характеристиками, проведён анализ процессов теплообмена при выделении тепла под воздействием тепловых нейтронов в процессе наработки изотопа селен-75 в реакторе ИВВ-2М. На рисунке 3 представлены следующие результаты: поля давления, скорости теплоносителя, температуры текучей среды и твердого тела.

Температурный перепад на входе и выходе из активной зоны равнялся 30,08 градусам при объёмном расходе теплоносителя через участок активной зоны 12 м<sup>3</sup>/ч.

В процессе расчёта было выявлено, что наибольшая температура (74 °С) достигается в первом по направлению потока облучательном устройстве. Это связано с высоким тепловыделением от топливных сборок и более низкой интенсивностью теплообмена на входе. Отсутствие достижения критической температуры обусловлено применением алюминия – металла, обладающего высокой степенью теплопроводности.

### **Заключение**

По результатам моделирования был проведён анализ теплогидравлических условий, возникающих под воздействием потока тепловых нейтронов в процессе наработки изотопа селен-75 в активной зоне реактора ИВВ-2М.

Максимальная температура ячейки селена составляет 74 °С, при температурном перепаде 30,08 °С. Получены картины распределения температур в материалах и теплоносителе, скорости и давления. Использование алюминия с высоким коэффициентом теплопроводности позволяет получить приемлемые значения коэффициента теплоотдачи между теплоносителем и стенками трубок сепаратора облучательного устройства, что гарантирует отсутствие перегрева ячеек и достижения температуры плавления селена.

Для верификации результатов компьютерного моделирования теплогидравлических процессов при наработке селена-75 планируется проведение экспериментальных исследований на ИЯУ ИВВ-2М.

### ***Библиографический список***

1. Ташлыков О. Л. Основы ядерной энергетики / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 225 с.
2. Русских И. М. Получение радиоактивных изотопов в исследовательском ядерном реакторе для экспериментальных исследований свойств гомогенных радиационно-защитных материалов / И. М. Русских, О. Л.



- Ташлыков // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИИ. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 254–257.
3. Russkikh I. M. Experimental and Theoretical Study of Organometallic Radiation-Protective Materials Adapted to Radiation Sources with a Complex Isotopic Composition / I. M. Russkikh, E. N. Seleznev, O. L. Tashlykov, S. E. Shcheklein // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2015. – Vol. 78, Is. 12. – P. 1451–1456.
  4. Селезнев Е. Н. Использование альтернативных радиационно-защитных материалов при транспортировании радиоактивных материалов (на примере источника лютеций-177) / Е. Н. Селезнев, А. В. Козлов, О. Л. Ташлыков // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИИ. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 274–277.
  5. Litovchenko V. Yu. Modeling radiation protection of containers for transporting isotopes with high-energy beta irradiation. / V. Yu. Litovchenko, N. A. Vasutin, O. L. Tashlykov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – 2174 : Physics, technologies and innovation (PTI-2019) : Proceedings of the VI International Young Researchers' Conference. – 020134.
  6. Литовченко В. Ю. Моделирование радиационной защиты контейнеров для транспортировки высокоэнергетических бета-источников / В. Ю. Литовченко // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*. – 2019. – Вып. 5 (101). – С. 4–12.
  7. Злоказов С. Б. Методические инженерные подходы к производству изотопов на реакторе ИВВ-2М / С. Б. Злоказов, А. А. Джанелидзе, Е. И. Злоказова [и др.] // *Атомная энергия*. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 227–233.
  8. Русских И. М. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М / И. М. Русских // *Атомная энергия*. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 183–187.
  9. Чижигов Д. М. Селен и селениды / Д. М. Чижигов, В. П. Счастливый. – Москва : Наука, 1964. – 320 с.
  10. Pat. EP 1 173 855 B1, MPK G21G 4/04. Gamma-Strahlungsquelle : N 00920911.5 : Priority: 27.04.1999 : publication 23.01.2002 / Shilton M., Golder Aston Clinton. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/37/88/1c/-b4edd3f5c11c65/EP1173855B1.pdf> (accessed: 19.03.2020).
  11. Kurteev A. V. Numerical simulation of residual heat removal from the spent fuel assemblies storage pit / A. V. Kurteev, V. A. Klimova, M. M. Sevastyanov, O. L. Tashlykov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – 2174 : Physics, technologies and innovation (PTI-2019) : Proceedings of the VI International Young Researchers' Conference. – 020170.
  12. Kostarev V. S. Simulation of natural cooling modes of containers with radioactive wastes / V. S. Kostarev, V. A. Klimova, O. L. Tashlykov // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – 020044 (2018).
  13. Моделирование теплогидравлических процессов в шахте-хранилище облученных ТВС реактора ИВВ-2М / Д. Н. Литвинов, М. М. Севастьянов, А. В. Куртеев [и др.] // *Ядерные технологии: от исследований к внедрению : сб. материалов науч.-практ. конф.* – Нижний Новгород : НГТУ, 2018. – С. 18–19.

14. Моделирование теплогидравлических процессов в змеевиковом теплообменнике для определения эффективности теплообмена / Д. Е. Шумков, Д. Н. Литвинов, В. А. Климова, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 990–993.
15. Костарев В. С. Теплогидравлическое моделирование облучательных устройств для наработки изотопов / В. С. Костарев, Д. Н. Литвинов, Н. Аристов [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ, 2019. – С. 741–744.
16. Серков И. А. Построение твердотельной модели облучательного устройства для наработки изотопа селен-75 / И. А. Серков, Н. М. Аристов, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ, 2019. – С. 765–768.
17. Сравнительное моделирование и тестирование адекватности расчётов рекуператора в пакетах инженерного моделирования / В. Н. Черных, П. А. Илюхин, Т. Ф. Шагабутдинов [и др.] // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. – 2017. – С. 266–270.
18. Solidworks Flow Simulation : Technical Reference'2020. – URL: <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2019/12/solidworks-flowsimulation-2020-helps-you-make-better-decisions-for-superior-performance.html> (accessed: 19.03.2020).